

磁场作用下微柱阵列表面的浸润效应*

李兴济¹ 陈少华²

(1: 中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室, 100190)

2: 北京理工大学先进结构技术研究院, 100081)

摘要 通过对自然界各种奇特的生物表面的研究, 研究者已经仿制出具有强黏附和超疏水性的仿生微柱阵列表面。为了进一步实现仿生表面的功能化, 需要人工调控其表面性能的强弱。在已有的实验中, 通过磁场, 可以可逆调控磁颗粒修饰的微柱阵列表面的形貌, 实现黏附、浸润性能调控。本文从理论方面, 利用最小势能原理, 建立了磁场与微柱变形的微分方程。经过二维理论模型和 Surface Evolver 数值模拟, 证明了当微柱倾斜超过临界值时, 三相接触线将发生移动, 具体形式与液滴的固有接触角有关。以此为基础, 利用改进的 Cassie-Baxter 方程, 定量给出了随微柱倾角增加, 浸润性能的改变趋势。并且发现液滴沿微柱倾斜方向的滚动能力, 优于相反方向, 并随着倾角增大, 各向异性有进一步扩大的趋势。本文为实现表面性质可逆调控, 液滴定向输运提供了理论基础, 可指导仿生表面功能化的设计。

关键词: 微柱阵列表面, 接触角滞后, Cassie-Baxter 状态, Surface Evolver, 可逆调控

一、引言

在自然界中, 水滴在动植物的表面有许多奇特的润湿性质, 例如超疏水性、各向异性的滚动性等^[1, 2]。这些优秀的表面性质源自于生物表面奇特的微纳结构^[1-3]。经过对仿生表面微纳结构形貌特征的研究, 已经可以制备具有上述表面性质的特异性仿生表面^[4, 5]。美中不足的是, 一旦制备完成, 这些仿生表面的性能将不再发生变化, 难以适应瞬息万变的外界环境。最近, Drotlef 课题组^[6]和 Jeong 课题组^[7]对微柱阵列表面进行磁修饰, 实现了外场作用下表面形貌的改变, 进一步产生了疏水能力和方向性的改变。本文将从理论角度分析并解释在外场作用下微柱阵列表面的变形, 以及变形对浸润能力改变的本质原因。其结论可指导仿生表面功能化的设计。

二、磁场作用下微柱的变形

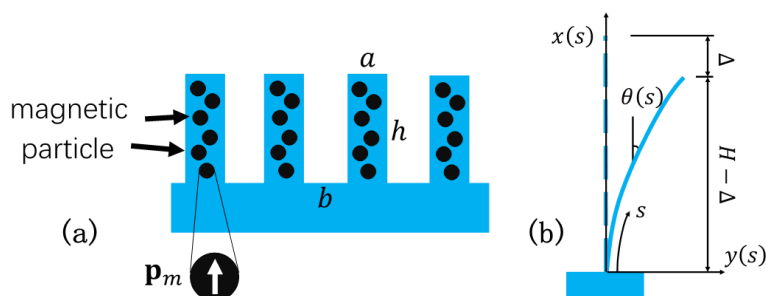


图 1 磁颗粒修饰的微柱阵列表面(a)及模型简化(b)

* 通讯作者: 电话: +86-10-68913927.

电子邮件: chenshaohua72@hotmail.com (陈少华).

国家自然科学基金: (11302228, 11372317, 11532013)

掺杂磁颗粒的微柱，建立如图 1 (b) 所示的二维简化模型。考虑弹性能、磁场外力功和拉格朗日乘子项，建立微柱的总势能：

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^H EI \theta'^2 ds - \int_0^H ds \int_0^\theta M \cos \theta d\theta + \int_0^H \lambda_1 (x' - \cos \theta) ds + \int_0^H \lambda_2 (y' - \sin \theta) ds \quad (1)$$

对总势能进行一阶变分，得到由无量纲磁场强度 $\bar{B} = (\mu_r - 1) B_R BVH^2 / \mu_0 \mu_r EI$ 控制的归一化非线性微分方程：

$$\bar{\theta}''(\bar{s}) + \bar{B} \cos \bar{\theta}(\bar{s}) = 0, \quad \bar{\theta}(0) = 0, \quad \bar{\theta}'(1) = 0 \quad (2)$$

求解微分方程，可得微柱的挠曲方程、倾角 φ 和顶端纵向位移 $\bar{\Delta}$ 等几何变量。

三、倾斜微柱阵列的浸润效应

3.1 三相接触线的移动

经过理论分析与 Surface Evolver 数值模拟，发现微柱弯曲时，若倾角超过临界值 φ_{cr} ，三相线不再钉扎在微柱顶端，将会发生移动，移动的模式与液滴的固有接触角 θ_Y 有关 (图 2)。临界倾角表达式：

$$\begin{cases} \theta_Y - \varphi_{cr} + \arctan \frac{a+b-a \cos \varphi_{cr}}{a \sin \varphi_{cr}} = \pi, & \theta_Y < 135^\circ \\ \theta_Y + \varphi_{cr} + \arctan \frac{a \sin \varphi_{cr}}{a+b-a \cos \varphi_{cr}} = \pi, & \theta_Y > 135^\circ \end{cases} \quad (3)$$

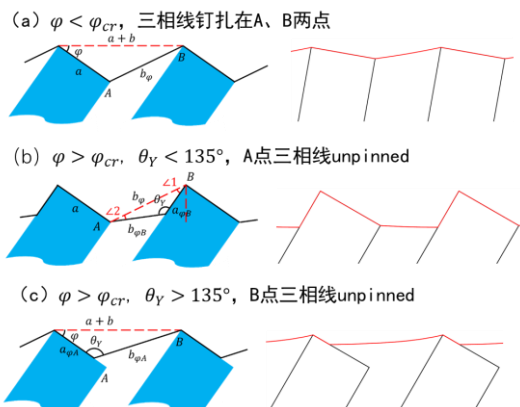


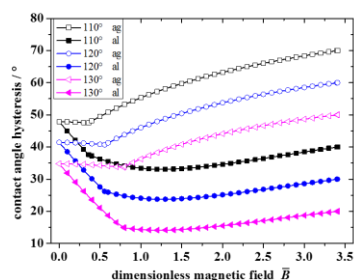
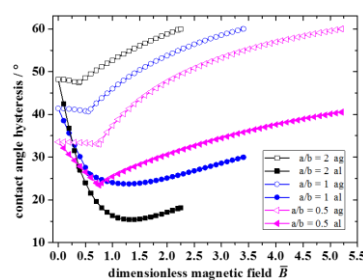
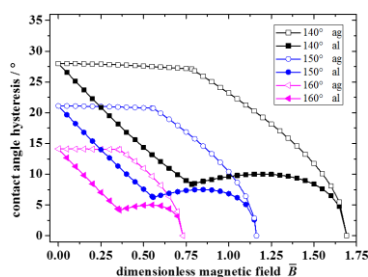
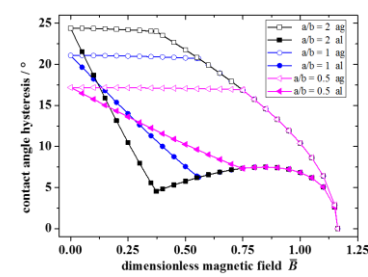
图 2 三相线的移动，左：理论分析，右：SE 模拟

3.2 液滴滚动难易程度的各向异性

三相接触线的移动，破坏了原有微柱结构的局部对称性，液滴沿微柱倾斜方向 (al 方向) 与沿相反方向 (ag 方向) 滚动的前端、后端的润湿状态各有不同，液滴的滚动能力 (接触角滞后，CAH) 也表现出各向异性。利用改进的 Cassie-Baxter 关系^[8]

$$\cos \theta_{CB} = r_f f_d \cos \theta_1 + (1 - f_d) \cos \theta_2$$

，定量给出液滴在 al、ag 方向上的 CAH 的变化关系。

图 3 不同 θ_Y 的 CAH 变化趋势 ($\theta_Y < 135^\circ$)图 4 不同 a/b 的 CAH 变化趋势 ($\theta_Y < 135^\circ$)图 5 不同 θ_Y 的 CAH 变化趋势 ($\theta_Y > 135^\circ$)图 6 不同 a/b 的 CAH 变化趋势 ($\theta_Y > 135^\circ$)

四、结论

(1) 外加磁场作用下, 微柱发生弯曲变形, 当倾角超过临界值时, 三相接触线将发生移动, 移动的模式与液滴的固有接触角 θ_Y 有关; 表面形貌变化引起的接触线移动, 是浸润行为变化的原因。

(2) 随着磁场强度增加, 表面由各向同性转变为各向异性, 即液滴易于向微柱倾斜方向 (al) 滚动。

(3) 几何参数相同的基底, 液滴固有接触角 θ_Y 越大, 超疏水性越强, 液滴越易滚动。

(4) 微柱间隙相对越小, 各向异性越大。

参 考 文 献

- 1 Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- 2 Zheng Y M, Gao X F, Jiang L. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings[J]. *Soft Matter*, 2007, 3(2): 178-182.
- 3 Wang Q B, Yao X, Liu H, et al. Self-removal of condensed water on the legs of water striders[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(30): 9247-9252.
- 4 Chu K H, Xiao R, Wang E N. Uni-directional liquid spreading on asymmetric nanostructured surfaces[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(5): 413-417.
- 5 Contraires E, Teisseire J, Sondergard E, et al. Wetting against the nap - how asperity inclination determines unidirectional spreading[J]. *Soft Matter*, 2016, 12(28): 6067-6072.
- 6 Drotlef D M, Blumler P, Papadopoulos P, et al. Magnetically Actuated Micropatterns for Switchable Wettability[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(11): 8702-8707.

- 7 Kim J H, Kang S M, Lee B J, et al. Remote Manipulation of Droplets on a Flexible Magnetically Responsive Film[J]. Scientific Reports, 2015, 5.
- 8 Choi W, Tuteja A, Mabry J M, et al. A modified Cassie-Baxter relationship to explain contact angle hysteresis and anisotropy on non-wetting textured surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 339(1): 208-216.